مقاومت جریان در یک رودخانهٔ شنی- قلوه سنگی در حضور توده‌های گیاهی موضعی و شکل‌های بستر گوداب و خیزاب (مطالعهٔ موردی: رودخانهٔ ماربر پادنا) *

پژوهشی

کورش نصرتی[۱] حسین افضلی مهر[۲] مروان حسن[۳] مسعود کاظم[٤]

چکیده *هدف از این پژوهش برآورد مقاومت جریان در یک رودخانهٔ شنی قلوه‌سنگی از طریق خصوصیات نیم‌رخ سرعت در حضور شکل‌های سه‌بعدی بستر گوداب و خیزاب و توده‌های گیاهی پراکندهٔ انعطاف‌پذیر مستغرق است. برای نیل به این هدف ۳۹ نیم‌رخ سرعت در نقاط مختلف چهار بازهٔ کاملا مستقل رودخانهٔ ماربر پادنا مورد بررسی قرار گرفته‌است. نتایج نشان می‌دهد که عمق اعتبار قانون لگاریتمی به موقعیت محل اندازه‌گیری‌ها شامل ورودی گوداب و خروجی از آن بستگی دارد. شکل غالب میزان انحراف از این قانون در ورودی گودآب به‌سمت بالا، در خروجی گوداب به‌سمت پایین و خیزاب غالبا به‌سمت پایین مشاهده شده‌است که اثر مستقیم در برآورد مقاومت جریان دارد. هم‌چنین نتایج حاصل از بررسی مقاومت جریان حاکی از آن است که ضریب مقاومت جریان با نسبت انسداد به‌صورت نمایی با ضریب هم‌بستگی بزرگ‌تر از ۰/۸ در ارتباط است و نسبت انسداد می‌تواند پارامتر مناسبی در برآورد مقاومت جریان در رودخانه‌های شنی با توده‌های گیاهی پراکنده و شکل بسترهای سه‌بعدی گوداب و خیزاب باشد.*

واژه‌های کلیدی گوداب و خیزاب، مقاومت جریان، ماربر پادنا، تودهٔ گیاهی مستغرق، قانون لگاریتمی، نسبت انسداد.

Resistance to Flow in a Cobble-Gravel Bed River with Irregular Vegetation Patches and Pool-Riffle Bedforms (Case study: Padena Marbor River)

K. Nosrati H. Afzalimehr MA. Hassan M. Kazem

Abstract *This study was intended to estimate resistance to flow through velocity profile characteristics in a cobble-gravel bed river with 3D-Pool-Riffle bedforms and irregular distribution of flexible-submerged vegetation patches. To this end, a total of 39 velocity profiles consisting of four independent sections of Padena Marbor River have been studied. The finding showed that the depth of validity logarithmic law depends on the location of measurements including both inlet and outlet of the Pool. The predominant form of deviation from this law is frequently observed upwards at the inlet of the Pool and downwards at the outlet of the Pool and Riffle, which has a direct effect on the estimation of resistance to flow. Moreover, the results of resistance to flow revealed that the coefficients of resistance to flow are exponentially related to blockage area with a correlation coefficient greater than 0.8. Therefore, blockage area can be a suitable parameter in estimating resistance to flow in cobble-gravel bed rivers with 3D bedforms and irregular vegetations patches.*

Key Word Pool and Riffle, Resistance to flow, Padena Marbor River, Submerged vegetation patches, Logarithmic law, Blockage area.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۹/۱۲/۷ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۰/٦/۲۷ و از صفحه ۳۵ تا ۵۰ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری رشتهٔ مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشکدهٔ مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران.

(۲) نویسندهٔ مسئول: استاد گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشکدهٔ مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران.

Email: hafzali@iust.ac.ir

(۳) استاد دانشکدهٔ جغرافیای دانشگاه بریتیش کلمبیای کانادا.

(٤) دانشجوی دکتری رشتهٔ مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشکدهٔ مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران.

مقدمه

اثر متقابل جریان و پوشش گیاهی بسیار پیچیده است و تحت تأثیر عوامل زیست‌محیطی و هیدرولیکی زیادی هم‌چون خصوصیات پوشش گیاهی، متوسط سرعت جریان، میزان آشفتگی، هندسهٔ کانال، دمای آب، توزیع ذرات بستر و نحوهٔ توزیع توده‌های گیاهی بستر رودخانه قرار دارد [1]. بررسی اثر متقابل جریان و پوشش گیاهی برای طرح‌های مهندسی رودخانه از اهمیت قابل‌توجهی برخوردار است. شرایط جریان بر نقش توده‌های گیاهی در انتقال رسوب، حل مواد مغذی و آلودگی‌های آبی، زیستگاه آبزیان و سایر عوامل زیست‌محیطی اثرگذار است. در مقابل شرایط و موقعیت توده‌های گیاهی بر عمق جریان، انتقال سیلاب، گنجایش انتقال رسوب و سایر پارامترهای هیدرولیکی و هیدرولوژیکی نیز اثرگذار است.

بررسی مطالعات مربوط به مقاومت جریان در چند دههٔ اخیر کانال‌های با پوشش گیاهی نشان می‌دهد که نگرش‌های تئوری و مفهومی زیادی در این رابطه وجود دارد [2]. یک اتفاق نظر کلی در این رابطه است که ضرایب مقاومت از قبیل ضریب مانینگ، ضریب شزی و ضریب دارسی وایسباخ به پارامترهای جریان (عدد رینولدز، عدد فرود و عمق نسبی)، مصالح بستر (قطر ذرات)، شکل‌های بستر، شکل کانال و هندسهٔ پوشش گیاهی بستگی دارند [3]. کمی‌سازی این وابستگی‌های در مطالعات هیدرولیک کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌است. مطالعاتی به‌منظور تخمین مقاومت جریان در کانال‌های با پوشش‌گیاهی انعطاف‌پذیر انجام شده‌است [4,5]. اگرچه روابط لگاریتمی به‌راحتی قابل استخراج هستند، اما عواملی هم‌چون، تراکم گیاهی، اندازهٔ توده‌های گیاهی، خصوصیات حجمی و خصوصیات سطحی پوشش‌گیاهی را مورد نظر قرار نمی‌دهند. کوون و همکاران (۱۹۶۹) نسبت سطحی پوشش‌گیاهی به سطح کل کانال بااستفاده از قانون لگاریتمی را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که این رابطه نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد. بر این اساس روابط لگاریتمی برای بررسی جریان در بالای توده‌های گیاهی، کاربردی نیستند [6]. نیکورا و همکاران (۲۰۰۸) تأثیر پوشش‌گیاهی بر مقاومت هیدرولیکی جریان را مورد بررسی قرار دادند و روشی به‌منظور تخمین ضریب اصطکاک بااستفاده از پارامترهای پوشش‌گیاهی ارائه دادند. این محققان نشان دادند که پارامترهای فیزیکی متوسط‌گیری‌شده در محل بررسی پوشش‌گیاهی ممکن است پارامترهای اصلی تخمین مقاومت هیدرولیکی در کانال‌های پوشیده از پوشش‌گیاهی باشند [3]. بررسی تأثیر ارتفاع پوشش‌گیاهی مستغرق بر مقاومت هیدرولیکی جریان توسط وانگ و همکاران (۲۰۱۰) از طریق یک رابطهٔ خطی بین عدد رینولدز و مقاومت جریان صورت گرفته‌است [7]. لی و همکاران (۲۰۱۵) اظهار داشتند که در رودخانه‌ها، پوشش‌گیاهی تأثیر زیادی بر آشفتگی و اصطکاک بستر دارد [8]. زمانی که جریان در قسمت فوقانی توده‌های گیاهی حرکت می‌کند، یک لایهٔ مرزی روی تودهٔ گیاهی شکل می‌گیرد. چنانچه طول تودهٔ گیاهی کوتاه باشد، جریان روی تودهٔ گیاهی کاملا توسعه یافته نیست بلکه در حال توسعه است. سطح ناهموار بالای تودهٔ گیاهی باعث ایجاد جریان غیریکنواخت می‌شود که توسط توزیع سرعت غیریکنواخت قابل اندازه‌گیری است. جریان‌های توسعه‌یافته اغلب در قسمت فوقانی توده‌های گیاهی کوچک در رودخانه‌ها ملاحظه می‌شوند. اشکال بستر و حضور پوشش گیاهی انعطاف‌پذیر غیرمستغرق در جدارهٔ کانال تأثیر به‌سزایی بر ساختار جریان در رودخانه‌ها و مجاری روباز دارد. حضور پوشش گیاهی انعطاف‌پذیر غیرمستغرق در جدارهٔ کانال [9]، تأثیر پوشش گیاهی قرار گرفته برروی شکل‌های بستر در رودخانه‌های شنی [10]، تخمین مقاومت جریان در حضور توده‌های گیاهی مستغرق به‌صورت آزمایشگاهی [11] توسط محققان انجام شده‌است. اما در هر صورت اثر حضور پوشش گیاهی بر ساختار جریان برروی برخی از عوامل هیدرولیکی از جمله شکل‌های

بستر گوداب (Pool) و خیزاب (Riffle) هنوز روشن نیست و میزان عمق اعتبار قانون لگاریتمی، تغییرات ثابت فون کارمن و برآورد مقاومت جریان در حضور شکل بسترهای سه‌بعدی نظیر گوداب و خیزاب در رودخانه‌های شنی دارای توزیع توده‌های گیاهی پراکنده، کمتر مورد توجه قرار گرفته‌است. هدف از این پژوهش بررسی خصوصیات نیم‌رخ سرعت در حضور شکل‌های بستر گوداب و خیزاب همراه با توده‌های گیاهی پراکنده در بستر رودخانه و ارائهٔ رابطهٔ نیمه‌تحلیلی مقاومت جریان است.

منطقهٔ مورد مطالعه و اندازه‌گیری‌ها

داده‌های مورد اســتفاده در این در پژوهش در چهار بازهٔ مختلف در تابســتان ۱۳۹۹ از رودخانهٔ ماربر پادنا در جنوب ا ستان ا صفهان جمع‌آوری شدها ست. بازهٔ اول، دوم و سوم شامل شکل بسترهای بزرگ مقیاس گوداب و خیزاب اســت که از میان این ســه بازه، بازهٔ اول فاقد توده‌های گیاهی در بستر و بازه‌های دوم و سوم شامل توده‌های گیاهی در بستر به‌ترتیب در سـمت راسـت و چپ رودخانه هســتند. در مقیاس های کوچک قانون لگاریتمی برای نیم‌رخ‌های سـرعت جوابگو نیسـت و از توابع توانی ســرعت به‌جای تابع لگاریتمی بهره گرفته می‌شود. این در حالی است که در مقیاس‌های متوسط و بزرگ عمق نســبی قانون لگاریتمی ســرعت به‌خوبی جوابگو اســت [2]. در این پژوهش در بازه‌های اول تا سوم عمق نسبی بزرگ‌تر از ۱۰ ا ست و در بازهٔ چهارم در ٦٤ در صد نقاطی که نیم‌رخ سرعت بردا شت شدند، عمق نسبی کمتر از ۱۰ و در نقاط باقی‌مانده عمق نسبی بزرگ‌تر از ۱۰ محاسبه شده‌است.

شکل (۱) بازه‌های انتخابی برای اندازه‌گیری داده‌ها در رودخانهٔ ماربر پادنا را نشان می‌دهد. به‌منظور برداشت مختصات و مقادیر ارتفاعی بستر از دوربین نقشه‌برداری توتال استیشن استفاده شده‌است.



شکل ۱ بازه‌های برداشت داده در رودخانهٔ ماربر پادنا

جدول (۱) م شخ صات هند سی شکل‌های ب ستر گوداب و خیزاب شامل طول شکل بستر (فاصلهٔ تاج تا تاج)، عرض متوسـط شـکل بسـتر، قطر متوسـط ذرات بستر در هر بازه، شیب ورودی گوداب، شیب خروجی گوداب و تعداد نقاط بردا شت شدهٔ ارتفاعی برای تر سیم توپوگرافی ب ستر را ن شان می‌دهد. در این جدول منظور از طول گام، طول گام نقشه‌برداری ا ست. بدین صورت که برای نقشـــه‌برداری در هر بازه، ابتدا هر بازه به شبکه‌های مربعی ۰/۵ در ۰/۵ متر تقسیم‌بندی شده‌است و ارتفاع مرکز هر مربع توســط دوربین نقشـــه‌برداری برداشت شده‌است.

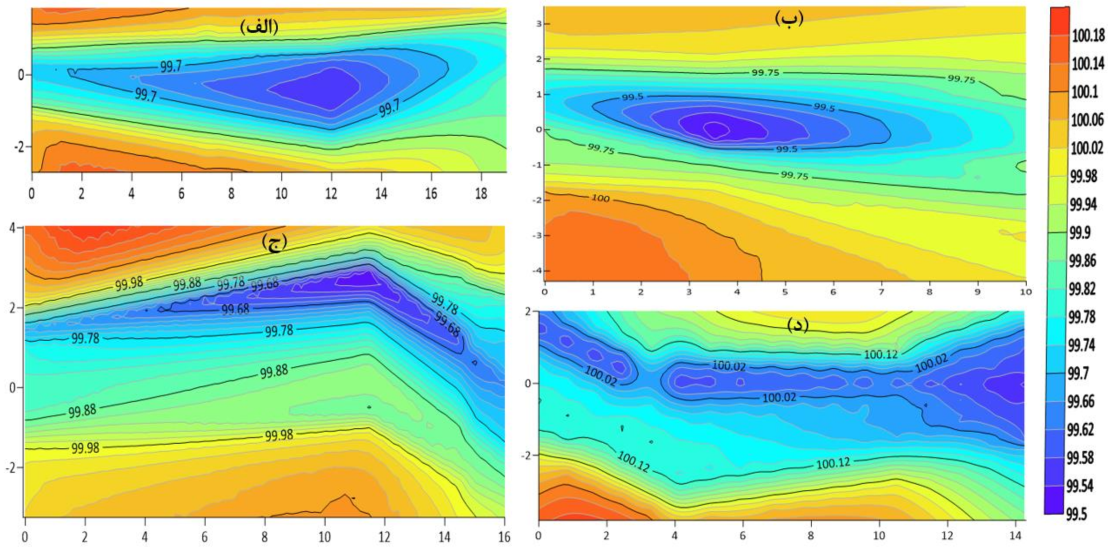
جدول ۱ ابعاد هندسی بازه‌های برداشت‌داده

شمارهٔ بازه	طول بازه (m)	طول شکل بستر (m)	عرض متوسط شکل بستر (m)	قطر متوسط ذرات (mm)	طول گام (m)	شیب ورودی گوداب	شیب خروجی	تعداد نقاط برداشتی
۱	۱۹	۱۲	۳/۱۵	۲۳/۸	۰/۵	۰/۰۵۵	۰/۰٤٤	۵۳۰
۲	۱۰	۸/۵	٤/۳٦	۲۲/۳۲	۰/۵	۰/۱۳	۰/۰۷	٤٤۱
۳	۱٦	۱۱	٤/۹۵	۲٤/۵	۰/۵	۰/۰٤۱	۰/۰٤	٦۲٤
٤	۱٤/۲۵	–	٤/۰٤	۱۹/۸	۰/۵	–	–	۲۳۹

شکل (۲) نقشهٔ توپوگرافی بستر را که در نرم‌افزار سورفر ترسیم شده‌است نشان می‌دهد. در شکل (۲- الف) می‌توان دریافت که عمیق‌ترین بخش بازه که گوداب نامیده می‌شود، در فاصلهٔ ۳/۸ متری از ابتدای بازه قرار گرفته‌است. این مقدار برای بازه‌های (۲- ب)، (۲- ج) به‌ترتیب ۳/۵، ۱۰/۵ متر از ابتدای هر بازه است. شکل (۲- د) بازهٔ چهارم را با طول ۱۴ متر و شیب متوسط ۰/۰۳ نشان می‌دهد. اختلاف بین عمیق‌ترین و کم‌عمق‌ترین نقاط در بازه‌های اول، دوم، سوم و چهارم باتوجه به شکل (۲) به‌ترتیب ۶۸، ۹۰، ۶۰ و ۴۶ سانتی‌متر محاسبه شده‌است.

برداشت دانه‌بندی بستر به‌روش ولمن (۱۹۵۴) انجام گرفته‌است [12]. در سه بازهٔ اول برداشت داده، سه دانه‌بندی به‌ترتیب در ورودی گوداب، وسط گوداب و خروجی گوداب برداشت شده‌است. هم‌چنین در بازهٔ چهارم در چهار مقطع از پایین‌دست بازه به‌سمت بالادست بازه، منحنی دانه‌بندی ترسیم شده‌است.

جدول (۲) دانه‌بندی بستر را به‌روش شمارش شنی در بازه‌های برداشت داده نشان می‌دهد. قابل ذکر است که انحراف معیار هندسی به‌صورت $\sigma_g = (d_{84}/d_{16})^{0.5}$ تعریف می‌شود. که d_{84} و d_{16} به‌ترتیب قطری از ذرات بستر هستند که ۸۴ و ۱۶ درصد ذرات از آن‌ها کوچک‌تر هستند.



شکل ۲ نقشه‌های توپوگرافی ترسیم‌شده در نرم‌افزار سورفر

جدول ۲ دانه‌بندی بستر به‌روش شمارش شنی وولمن

شمارهٔ بازه	قطر متوسط (mm)	تعداد منحنی دانه‌بندی	انحراف معیار هندسی
۱	۲۰/۷-۲۸/۱	۳	۲/۴۵-۳/۱۳
۲	۲۲-۲۲/۵	۳	۲/۱۸-۳/۱۹
۳	۲۱/۹-۲۶/۲	۳	۲/۰۳-۲/۲
۴	۱۵-۲۱/۲۱	۴	۳-۲/۱۲

جدول ۳ پارامترهای هیدرولیکی محاسبه‌شده در بازه‌های مختلف برداشت داده

بازه	$B(m)$	S_0	Fr	$u(m/sec)$	$u\ sec)_{max}$	$Q(m^{۳}/sec)$	تعداد نیم‌رخ
۱	۲/۳۶– ۳/۶۳	۰/۰۱٤– ۰/۰۳۷	۰/۳٤– ۰/٤۸	۰/۷۵– ۰/۹	۰/۸۹– ۱/۳٤	۰/۷۷– ۱/۳۷	۳
۲	٤/۲۲– ۷/۷۹	۰/۰۲۸– ۰/۱۲۸	۰/٤٤– ۰/۷٤	۱/۰۱– ۱/۱۷	۱/۳۵– ۱/٦۸	۱/۷۹– ۳/۰۹	۸
۳	۳/٦۳– ٤/۸	۰/۰۱۱– ۰/۰۲۲	۰/٥٤– ۱/۰۹	۰/۹۸– ۱/۳٦	۱/۱۷– ۱/۸۲	۰/۸٥– ۲/۱۸	۳
٤	۳/۸۸– ٥/۸٥	۰/۰۲– ۰/۰٦٥	۰/۳۸– ۰/۸٥	۰/٦– ۱/۰۲	۰/۷– ۱/۲٥	۰/٥٤– ۰/۸۷	۲٥

باتوجه به این‌که $\sigma_g > ۱.٤$ توزیع ذرات به‌صورت کاملا غیریکنواخت است [13]. اندازه‌گیری سرعت جریان به‌منظور ترسیم نیم‌رخ‌های سرعت توسط میکرو مولینه با دقت ۰/۱ متر بر ثانیه انجام گرفته‌است. مدت زمان اندازه‌گیری ۳۰ ثانیه و به‌منظور افزایش دقت آزمایشات سه بار تکرار در هر نقطه از نیم‌رخ سرعت جریان انجام شد. جدول (۳) خلاصهٔ پارامترهای هیدرولیکی محاسبه‌شده در هر چهار بازه را نشان می‌دهد.

در بازهٔ اول، دوم و سوم حضور ایستگاه پمپاژ که در شکل (۱- ب) نیز مشهود است، کانال بتنی که آب آن از رودخانهٔ اصلی تأمین می‌شود و حضور مزارع پرورش ماهی در بالادست بازه‌های برداشت داده، سبب متغییر بودن مقادیر دبی در هر بازه، علی‌رغم دائمی بودن جریان رودخانه است. متغییر بودن عمق در هر نقطه، غیریکنواخت بودن مصالح بستر، حضور توده‌های گیاهی پراکنده در بستر و متغیر بودن عرض رودخانه در هر نقطه که نیم‌رخ سرعت برداشت شده‌است، دلایل اصلی متفاوت بودن سرعت و دامنهٔ تغییرات شیب در هر بازه است.

در جدول (۳) B عرض رودخانه، S_0 شیب طولی بستر، $Fr = u/(gh_w)^{0.5}$ عدد فرود جریان در عمق متوسط جریان h_w، u سرعت متوسط جریان، u_{max} مقدار حداکثر سرعت در هر نیم‌رخ، Q دبی جریان و $g = 9.81\ m/s^2$ ثابت گرانش تعریف می‌شود. قابل ذکر است که در مجموع ۳۹ نقطه در بخش‌های مختلف هر بازه به‌منظور ترسیم نیم‌رخ‌های سرعت، برداشت شده‌است.

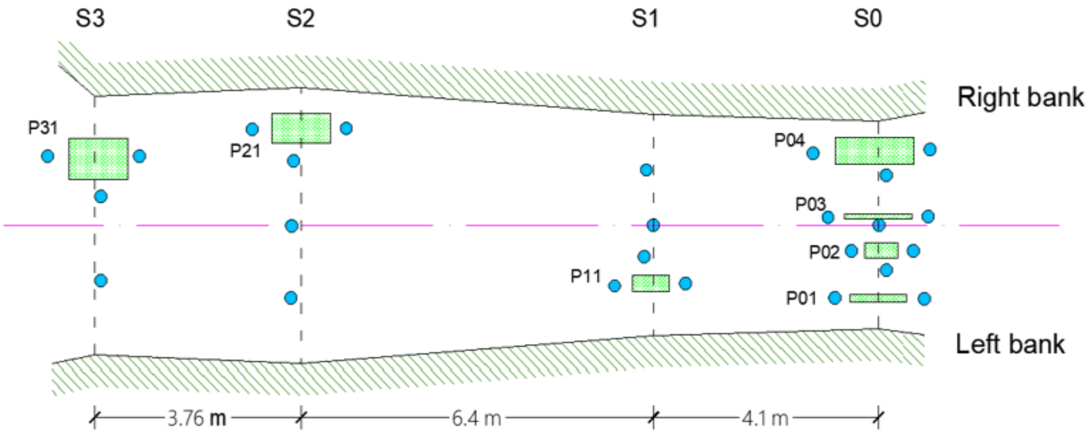
نوع پوشش گیاهی مستغرق انعطاف‌پذیر غالب که در بستر رودخانهٔ ماربر پادنا به‌وفور یافت می‌شود نوعی جلبک است که به‌شکل توده‌های گیاهی متراکم در بستر رودخانه رشد می‌کند. نمونه‌ای از آن در شکل (۳) مشاهده می‌شود.



شکل ۳ اندازه‌گیری ابعاد تودهٔ گیاهی مستغرق توسط متر با دقت یک سانتی‌متر در بازهٔ چهارم

باتوجه به این‌که اندازه‌گیری ابعاد دقیق تودهٔ گیاهی در رودخانه مشکل است، در این پژوهش تنها حداکثر طول و حداکثر عرض هر تودهٔ گیاهی توسط متر با دقت یک سانتی‌متر اندازه‌گیری شده‌است (شکل ۳).

همان‌گونه که در ذیل اشاره شده‌است، اندازه‌گیری سرعت توسط میکرومولینه، در بخش‌های مختلف هر بازه و در اطراف توده‌های گیاهی به‌منظور ترسیم نیم‌رخ صورت گرفت. به‌طور نمونه شکل (٤) نمایش اندازه‌گیری از یک طول ۱٤/۲٥ متر از بازهٔ چهارم در اطراف توده‌های گیاهی را نشان می‌دهد.



شکل ٤ جانمایی توده‌های گیاهی مستغرق در بازهٔ چهارم

در شکل (٤) مستطیل‌های سبزرنگ توده‌های گیاهی مستغرق و نقاط دایره‌ای آبی محل‌های برداشت سرعت در بازهٔ چهارم را نمایش می‌دهند. $S۰$ تا $S۳$ به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ شمارهٔ مقطع (Section) از صفر تا سه است. نشانه‌گذاری هر تودهٔ گیاهی در این بازه به‌صورت PXY نام‌گذاری شده‌است. به این صورت که تودهٔ گیاهی شمارهٔ Y در مقطع X قرار گرفته‌است.

به‌طور مثال P۰۱ به‌معنای اولین تودهٔ گیاهی (Patch) در مقطع صفر است. سایر نمادها نیز به‌همین صورت تعریف می‌شوند. جدول (٤) ابعاد هندسی توده‌های گیاهی مستغرق انعطاف‌پذیر در بازه‌های شامل پوشش گیاهی (بازه‌های دوم، سوم و چهارم) را ارائه می‌دهد. در این جدول، L_p^{max} طول حداکثر، B_p^{max} عرض حداکثر و $\bar{h}_p$ ارتفاع متوسط هر تودهٔ گیاهی را نشان می‌دهد. نام‌گذاری در بازه‌های دوم و سوم مستقل از بازهٔ چهارم است بدین صورت که P1 ، P2 توده‌های گیاهی واقع در بازهٔ دوم و P۳ توده‌های گیاهی واقع در بازهٔ سوم اندازه‌گیری هستند. لازم به ذکر است که برداشت داده‌های سرعت به فاصلهٔ ۱۰ سانتی متر از ورودی هر تودهٔ گیاهی، ۱۰ سانتی‌متر از خروجی تودهٔ گیاهی و ۱۰ سانتی‌متر در اطراف تودهٔ گیاهی صورت گرفته‌است.

جدول ٤ ابعاد هندسی توده‌های گیاهی در هر بازه

نام توده	L_p^{max}	B_p^{max}	$\bar{h}_p(m)$
P۱	٤	۰/۲٥	۰/۱
P۲	۰/۳۲	۰/۸	۰/۳۲
P۳	۱/٦	۰/۲٦٥	۰/۰۳
P۰۱	۱/۰٥	۰/۱۳	۰/۰٥
P۰۲	۰/٥۹	۰/۲۷	۰/۰٥
P۰۳	۰/۲٤	۰/۰۹	۰/۰٥
P۰٤	۱/٤٦	۰/٤۷	۰/۰٦
P۱۱	۰/٦۷	۰/۲۹	۰/۱
P۲۱	۱/۰۷	۰/٥۳	۰/۱٦
P۳۱	۱/۰۸	۰/۷۲	۰/۲۱

بحث و نتایج

تخمین ثابت انتگرال قانون جهانی سرعت و ثابت فون کارمن

در تئوری لایهٔ مرزی جریان در کانال‌های روباز دو لایهٔ مرزی آشفتگی در حالت کلی وجود دارد. در لایهٔ مرزی آشفتهٔ داخلی نیم‌رخ سرعت از قانون دیوار تبعیت می‌کند و توسط رابطهٔ (۱) بیان می‌شود:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa}\ln\left(\frac{z}{k_s}\right) + B_r \qquad (۱)$$

که در این رابطه u سرعت متوسط جریان در عمق

z ، u_* سرعت برشی ، κ ثابت فون کارمن، k_s ارتفاع زبری معادل و B_r ثابت انتگرال است. در این پژوهش ارتفاع معادل زبری بستر $k_s = d_{50}$ است که برای هر بازه و در هر قسمتی که نیمرخ سرعت بردا شت شده، متفاوت است.

قانون دیوار نخستین بار توسط فون کارمن (۱۹۳۰) برای نواحی نزدیک بستر (کمتر از ۲۰ درصد عمق) ارائه شده‌است. در رودخانه‌های درشت‌دانه ضخامت لایهٔ مرزی معادل یا کمتر از عمق جریان است و به دو قسمت تقسیم می‌شود: ناحیهٔ نخست که در نزدیکی بستر قرار دارد و در آن اثر زبری و لزجت قابل‌توجه است که به آن لایهٔ داخلی گفته می‌شود. با فاصله از بستر اثر لزجت کاهش و اثر گرادیان فشار افزایش می‌یابد. از این لایه تحت عنوان لایهٔ خارجی یاد می‌شود [14]. لایهٔ خارجی توسط قانون سهمی بیان می شود که به‌طور مفصل توسط افضلی مهر و آنکتیل (۱۹۹۹) بررسی شده و در این مقاله به آن پرداخته نمی‌شود [15].

به‌منظور تجزیه و تحلیل تئوری نیمرخ سرعت از سرعت برشی u_* استفاده می‌شود. در این پژوهش از روش مشخصات لایهٔ مرزی که نخستین بار توسط افضلی‌مهر و آنکتیل (۲۰۰۰) برای رودخانه‌های شنی ارائه شد، استفاده شده‌است [16]:

$$u_* = \frac{u^*_{max}}{4.4 \times \delta_*} \qquad (۲)$$

که در این رابطه δ_* و θ به‌ترتیب ضخامت جابه‌جایی و ضخامت مومنتوم لایهٔ مرزی به‌فاصلهٔ z از بستر هستند:

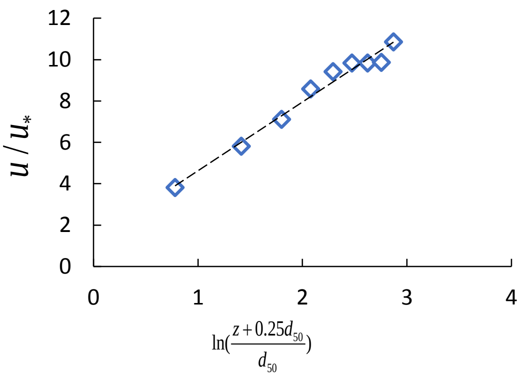
$$\delta_* = \int^{\int} (1 - \frac{u}{u_{max}} \qquad (۳)$$

$$\theta = \int \frac{u}{u_{max}}(1 - \frac{u}{u_{max}})dz \qquad (٤)$$

هم‌چنان که در کتاب مرجع هینز (۱۹۷۵) برای بسترهای زبر پیشنهاد شده‌است، شنی و قلوه‌سنگی بودن بستر رودخانهٔ مورد مطالعه و یکسان نبودن قطر ذرات بستر ایجاب می‌کند تا عمق جریان از یک بستر فرضی اندازه‌گیری گردد [17]. برا ساس تمامی روابط ارائه شده فرض شده‌است که در عمق صفر، سرعت جریان صفر است و برای ارائهٔ عمق صفر در رودخانه‌های درشت‌دانه از یک خط فرضی تحت عنوان خط مرجع استفاده می‌شود. به همین دلیل عمق اندازه‌گیری‌شده توسط رابطهٔ کلی زیر اصلاح می شود و عمق اصلاحی (y_*) از رابطهٔ (۵) محاسبه می‌شود [16]:

$$y_* = y_m + a \times d_p \qquad (۵)$$

در این رابطه y_m اعماق اندازه‌گیری‌شده، a ضریب تعدیل پروفیل لگاریتمی سرعت و d_p قطر مشخصهٔ ذرات بستر است. مقادیر متفاوتی برای a و d_p در منابع لحاظ شده‌است [14]. در این پژوهش $a = ۰.۲۵$ و $d_p = d_{50}$ درنظر گرفته شده‌است [14]. توزیع سرعت در ناحیهٔ نزدیک بستر موسوم به ناحیهٔ داخلی توسط قانون لگاریتمی (قانون دیوار) برروی بستر شنی و قلوه‌سنگی توسط رابطهٔ (۱) ارائه می‌شود [18]. در این پژوهش به‌منظور تخمین ثابت انتگرال $B_{r-River}$، ابتدا نمودار u/u_* برحسب $\ln((z + 0.25d_{50})/d_{50})$ برای داده‌های سرعت جریان نزدیک بستر (داده‌هایی که قانون لگاریتمی بدون انحراف بر آنها برازش می‌یابد) ترسیم شده و یک معادلهٔ رگرسیونی به‌دست آمد. از مقایسهٔ رابطهٔ (۱) با معادلهٔ رگرسیونی حاصل مقدار $B_{r-River}$ به‌دست آمد. شکل (۵) نحوهٔ محاسبهٔ $B_{r-River}$ در ورودی بازهٔ اول را نشان می‌دهد.



شکل ۵ تعیین مقادیر ثابت انتگرال و ثابت فون کارمن در ورودی بازهٔ اول

باتوجه به شکل (۵) در ورودی بازهٔ اول مقدار ثابت انتگرال $B_{r-River} = ۱.۳$ و ثابت فون کارمن $\kappa = ۰.۳$ براساس قانون لگاریتمی سرعت تخمین زده شده‌است.برای محاسبهٔ سرعت برشی از روش مشخصات لایهٔ مرزی استفاده شده‌است که توسط افضلی و رنیه (۲۰۰۹) برای رودخانه های ایران و کانادا به‌کار برده شده‌است. خوانندهٔ علاقمند می‌تواند به این مقاله برای جزئیات محاسبهٔ سرعت برشی از روش مشخصات لایهٔ مرزی مراجعه کند [19].

جدول (۵) مقادیر متوسط $B_{r-River}$ محاسبه‌شده در بازه‌های مختلف رودخانهٔ ماربر پادنا و مقدار گزارش‌شده B_{r-Re} توسط رینولدز (۱۹۷٤) [20] به‌همراه مقادیر متوسط ثابت جهانی فون کارمن برای ۳۹ نیم‌رخ سرعت در قسمت‌های مختلف هر بازه را نشان می‌دهد. RMSD به‌صورت رابطهٔ (٦) تعریف می‌شود.

$$\mathrm{RMSD} = \sqrt{\frac{\Sigma_{i=1}^{N}\Sigma(B_{r_River} - B_{r-Re}}{N}} \qquad (٦)$$

که N تعداد نیم‌رخ های برداشـــت ســـرعت در بازه های مختلف اســـت. RMSD میزان انحراف جذر متوسـط مقادیر مشـاهده‌شـده و محاسـبه‌شـده را نشـان می د هد. هر ا ندازه این مـقدار بزرگ‌تر باشـــد، میزان انحراف مقادیر مشاهده‌شده و محاسبه‌شده بیشتر خواهد بود.

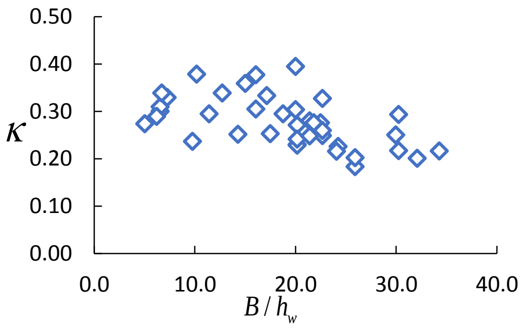
در جدول (٤) مقایسهٔ مقادیر $B_{r-River}$ بازهٔ دوم و سوم نسبت‌به بازهٔ اول نشان می‌دهد که حضور توده‌های گیاهی مستغرق در حضور شکل‌های بستر گوداب و خیزاب می‌تواند مقدار $B_{r-River}$ را به مقدار قابل‌توجهی کاهش دهد. از طرفی در بازهٔ چهارم زمانی که بستر فاقد شکل‌های بستر گوداب- خیزاب‌های بزرگ‌مقیاس است، مقدار $B_{r-River}$ در حضور توده‌های گیاهی پراکنده به‌میزان کمتری نسبت‌به نتایج رینولدز (۱۹۷٤) کاهش یافته‌است. B_r با تغییرات گرادیان فشار به‌صورت جزئی تغییر می‌کند [21]. حضور شکل‌های بستر سه‌بعدی گوداب و خیزاب و توده‌های نامنظم گیاهی پراکنده در بستر رودخانه منجر به ایجاد غیریکنواختی جریان می‌شود که پی‌آمد آن تفاوت‌های محسوس در تخمین مقدار B_r است. هم‌چنین مشاهدات نشان می‌دهد که شکل‌های بستر گوداب و خیزاب بر مقدار $B_{r-River}$ در بازه‌های دارای توده‌های گیاهی پراکنده کاهش بیشتری نسبت‌به نتایج رینولدز (۱۹۷٤) دارند. کیرنوتو و گراف (۱۹۹۰) مقدار $B_r = ۸.۸$ را برای بسترهای شنی تحت شرایط آزمایشگاهی کاملا کنترل‌شده گزارش کردند [18]. تفاوت نتایج مقدار B_r در بازه‌های مختلف نسبت‌به مطالعات پیشین به این دلیل است که محققان قبلی مقدار B_r را در حالتی تخمین زده‌اند که توزیع مؤلفه‌های سرعت جریان و تانسور تنش به‌صورت هم‌شکل بوده‌است، به‌عبارتی جریان لایهٔ مرزی متعادل بوده‌است که تحقق آن در رودخانه‌ها به‌دلیل تغییرات هندسی و هیدرولیکی امکان‌پذیر نیست بنابراین در این پژوهش جریان لایهٔ مرزی نامتعادل است.

ضریب κ موسوم به ثابت فون کارمن از طریق مقایسهٔ معادلهٔ رگوسیونی که برای محاسبهٔ $B_{r-River}$ استفاده شده با رابطهٔ (۱) به‌صورت $\kappa = \alpha u_*$ محاسبه می‌شود که در این رابطه u_* از روش مشخصات لایهٔ مرزی به‌دست می‌آید و α ضریب رگرسیون است. شکل (۵) تغییرات κ در مقابل نسبت ظرافت (B/h_w) در هر بازه را نشان می‌دهد.

جدول ۵ میزان RMSD برای بازه‌های مختلف

شمارG بازه	B_{r-Re}	$B_{r-River}$	$RMSD_{Br}$	$RMSD_{\kappa}$	N
۱	۸/۵	۷/۸۷	٤/۷٤	۰/۲٤	۳
۲	۸/۵	۱/۳۷	۸/۳۷	۰/۱۲	۸
۳	۸/۵	۵/۱٤	٤/٦۸	۰/۵٤	۳
٤	۸/۵	٦/۲۸	٦/۹	۰/٤۹	۲۵

باتوجه به شکل (۶) می‌توان نتیجه گرفت که مقدار κ را به‌راحتی نمی‌توان مقدار ثابت ۰/۴ درنظر گرفت. مقدار κ در این پژوهش بین ۰/۱۸ تا ۰/۳۹ نوسان داشته‌است. این دامنهٔ وسیع تغییرات مقدار κ توسط محققان مختلف در شرایط آزمایشگاهی و صحرایی تأیید شده‌است [13]. یکی از دلایل این تفاوت‌ها حضور شکل‌های بستر گوداب و خیزاب و توده‌های گیاهی پراکنده در بستر می‌باشد.

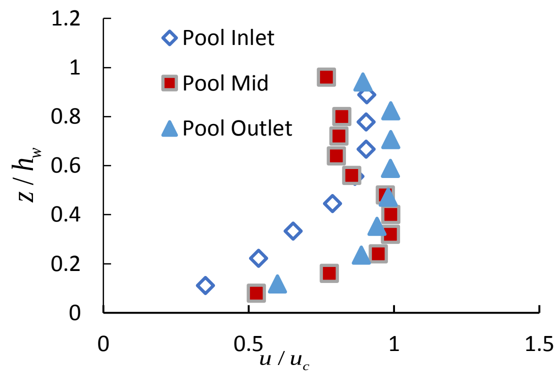


شکل ۶ تغییرات ثابت جهانی فون کارمن در برابر نسبت ظرافت در بازه‌های مختلف اندازه‌گیری

بررسی محل وقوع سرعت حداکثر

در نسبت‌های ظرافت کوچک (نسبت عرض به عمق کمتر از پنج) به‌دلیل تأثیر جریان‌های ثانویه بر ساختار جریان، محل وقوع سرعت حداکثر ممکن است تغییر کند [14]. درحالی‌که در نسبت‌های ظرافت بزرگ‌تر از ۵ این تأثیر کمتر مشاهده می‌شود. قرار گرفتن حداکثر سرعت جریان در زیر سطح آب پدیدهٔ فرورفتگی (Dip) نامیده می‌شود. پدیدهٔ فرورفتگی نسبت عمقی که در آن سرعت حداکثر رخ می‌دهد را به عمق کل جریان نشان می‌دهد. به‌منظور تعیین محل وقوع سرعت حداکثر در بازه‌های مختلف نمودار z/h_w بر مقابل u/u_c در هر نیم‌رخ ترسیم شده‌است.

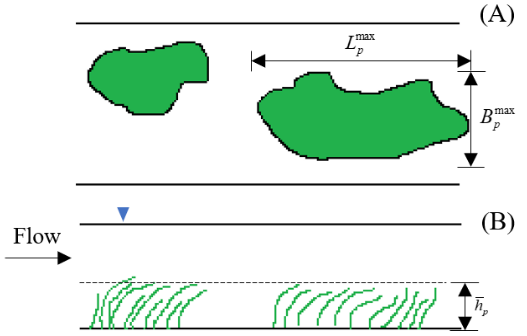
شکل (۷) نمونه‌ای از پدیدهٔ فرورفتگی جریان در بازهٔ اول اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. محل وقوع پدیدهٔ فرورفتگی در وسط و خروجی بازه به‌ترتیب در $0.4h_w$ و $0.8h_w$ حادث شده‌است. کیرنوتو و گراف (۱۹۹۴) برای جریان غیریکنواخت در آزمایشگاه بیان نمودند که در نسبت‌های ظرافت کمتر از پنج جریان سه‌بعدی است و پدیدهٔ فرورفتگی رخ می‌دهد [18]. با مقایسهٔ بازهٔ اول نسبت‌به بازهٔ دوم و سوم مشاهده می‌شود که اضافه شدن توده‌های گیاهی مستغرق در حضور شکل‌های بستر بزرگ مقیاس گوداب و خیزاب، پارامتر فرورفتگی را افزایش داده‌است. از طرفی با مقایسهٔ سه بازهٔ اول نسبت‌به بازهٔ چهارم می‌توان نتیجه گرفت که حذف شکل‌های بستر بزرگ مقیاس گوداب و خیزاب باعث افزایش پارامتر فرورفتگی و نزدیک‌تر شدن محل حادث سرعت حداکثر به سطح آب شده‌است. لکشمینارایانا و همکاران (۱۹۸۴) پارامتر فرورفتگی را برای جریان یکنواخت با بستر زبر تا $0.67h_w$ برای نیم‌رخ‌های محور مرکزی گزارش دادند [22]. همچنین کیرنوتو و گراف (۱۹۹۴) این مقدار را حدود $0.22h_w$ برای جریان‌های غیریکنواخت ارائه نمودند [18]. در این پژوهش در بازهٔ دوم و سوم مقدار پارامتر فرورفتگی به‌طور متوسط در قسمت‌های مختلف بازه $0.8h_w$ اندازه‌گیری شده‌است که نسبت‌به بازهٔ اول حدود ۱۱ درصد افزایش و نسبت‌به بازهٔ چهارم حدود ۱۲ درصد کاهش داشته‌است. دلیل این نوسانات پارامتر فرورفتگی به تغییرات موضعی ناشی از حضور شکل‌های بستر گوداب و خیزاب، غیریکنواخت بودن ذرات بستر و حضور توده‌های گیاهی پراکنده در بستر رودخانه بستگی دارد. مطالعات نظری براساس معادلات ناویه- استوکس نشان می‌دهد که وقوع پدیدهٔ فرورفتگی در جریان‌های غیریکنواخت تندشونده مانند خیزاب‌ها بیشتر از جریان‌های یکنواخت و غیریکنواخت کندشونده (گوداب‌ها) می‌باشد [23].



شکل ۷ وقوع پدیدهٔ فرورفتگی جریان در خروجی و وسط گوداب بازهٔ اول

برآورد مقاومت جریان

هدف از برآورد مقاومت جریان در این پژوهش بررسی ارتباط مقاومت جریان با تأکید بر ضـریب‌های مانینگ، شزی، ضریب دارسی- ویسباخ و ضریب دراگ و ابعاد هندسی توده‌های گیاهی مستغرق انعطاف‌پذیر در حضور شکل‌های سه‌بعدی بستر در رودخانه است. بیشـتر مطالعات مربوط به مقاومت جریان در شـرایط پوشش گیاهی مصنوعی در آزمایشگاه صورت پذیرفته و اثر پو شش گیاهی طبیعی کمتر برر سی شدها ست [1]. برای نیل به این هدف ۱۰ تودهٔ گیاهی مستغرق طبیعی با ابعاد هندسـی منطبق با جدول (٤) مورد بررسـی قرار گرفته‌است.



شکل ۸ نمای شماتیک توده‌های گیاهی مستغرق انعطاف‌پذیر (A) نمای پلان، (B) نمای کنار

شکل (۸) نمای شماتیک توده‌های گیاهی منطبق‌بر شکل (٤) در بازهٔ چهارم و سایر بازه‌ها را نشان می‌دهد. قابل ذکر اسـت از آنجایی که اندازه‌گیری ابعاد دقیق توده‌های گیاهی در برخی از قسمت‌ها از جمله بازهٔ دوم که آب عمق زیادی داشت میسر نبود، تنها به اندازه‌گیری حداکثر طول، حداکثر عرض و ارتفاع متوسـط تودهٔ گیاهی در تمامی بازه‌ها اکتفا شده‌است. آنالیزهای مربوط به مقاومت جریان بااسـتفاده از ضـریب مانینگ (n)، ضریب شزی (C) و ضریب دار سی وایـ‌سباخ (f)برای کـانـال مسـتطیلی عریض در این پژوهش صـورت گرفته‌است [3]:

$$\frac{u}{u_*}=\sqrt{\frac{8}{f}},\ C=\frac{u}{(h_w S_f)^{1/2}},\ n=\frac{h_w^{1/6}}{C} \qquad (۷)$$

هم‌چنین ضریب دراگ (C_D) محا سبه شده در این پژوهش بااستفاده از رابطهٔ (۸) تخمین زده شده‌است [24].

$$C_D = 2\frac{u_*^2}{u^2} \qquad (۸)$$

به‌منظور افزایش دقت در برآورد مقاومت جریان از داده‌های صحرایی نیکورا و همکاران (۲۰۰۸) در کنار داده‌های برداشت‌شده در رودخانهٔ ماربر پادنا استفاده شده‌است [3]. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری سرعت در رودخانه‌های مورد مطالعهٔ این محقق بااستفاده از دستگاه سرعت‌سنج صوتی در مقاطع عرضی مختلف که توده‌های گیاهی مستغرق حضور داشته‌اند، صورت گرفته‌است. محدودهٔ اعداد فرود و عدد رینولدز در بازه‌های مختلف نشان می‌دهد که رژیم جریان غالبا زیر بحرانی و آشفته کاملا زبر است.

پارامتر فیزیکی اساسی تأثیرگذار بر مقاومت جریان در این پژوهش نسبت انسداد (BF) که به‌صورت نسبت مساحت جلویی تودهٔ گیاهی عمود بر مسیر جریان (A_p) به مساحت مقطع عرضی جریان (A) تعریف می‌شود [3]:

$$BF=\frac{A_p}{A}=\frac{W_p^{max}h_p}{h_w\times B} \qquad (۹)$$

در این پژوهش ارتباط بین ضرایب دراگ، مانینگ، شزی و دارسی ویسباخ به‌عنوان ضرایب مقاومت (RC) با نسبت انسداد دارای ضریب همبستگی بزرگ‌تر از ۰/۸ با معادلهٔ توانی به‌شکل معادلهٔ (۱۰) است:

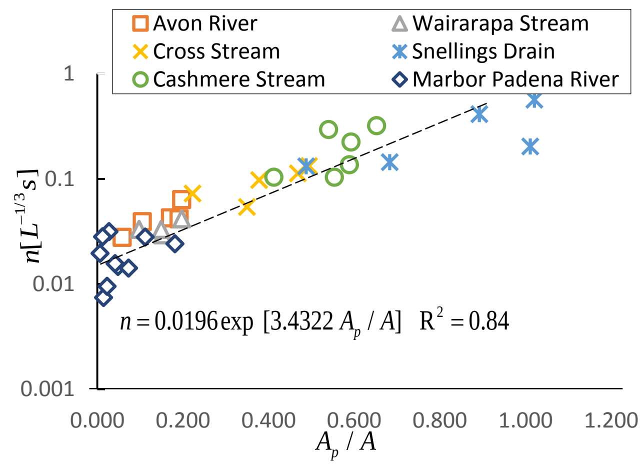
$$RC = m\exp(nBF) \quad R^2 \geq 0.8 \qquad (۱۰)$$

که m و n ضرایب ثابت هستند. نسبت انسداد در مطالعات کوان و همکاران (۱۹٦۹)، واتسـون (۱۹۸۷)، بـارکی و همکـاران (۱۹۹۲)، چمپیون وتنر (۲۰۰۰) و گرین (۲۰۰۵) بالاترین ضـریب هم‌بسـتگی را با کاربرد تابع توانی نشـان می‌دهند [3]. شـکل‌های (۹) تا (۱۱) ارتباط بین ضرایب مقاومت و نسبت انسداد را با ضریب هم‌بستگی بزرگ‌تر مساوی ۰/۸ نشان می‌دهد.

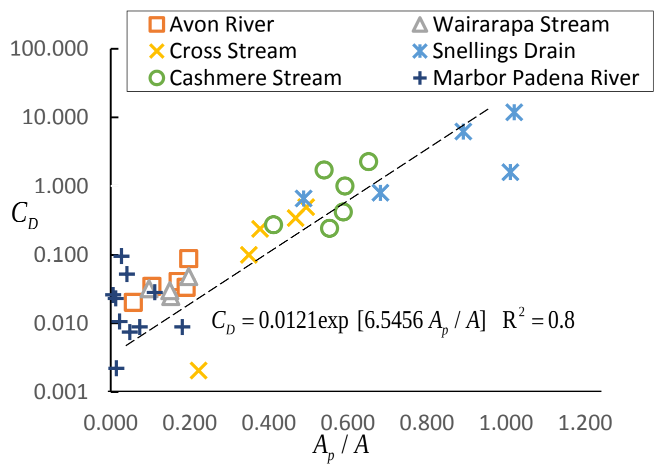
ارتباط بین ضریب مانینگ، ضریب شزی و نسبت انسـداد با نتایج حاصـل از گرین (۲۰۰٦) با ضـریب

هم‌بستگی ۰/۷۴ و نتایج نیکورا (۲۰۰۸) با ضریب هم‌بستگی ۰/۸۹ در یک مطالعهٔ صحرایی مقاومت جریان مشاهده شده است [25]. در تمامی نمودارها ارتباط بین ضرایب مقاومت جریان با نسبت انسداد به‌صورت نمایی با ضریب هم‌بستگی بزرگ‌تر مساوی ۰/۸ تغییر کرده‌است. این ارتباط غیرخطی می‌تواند نشئت گرفته از حضور شکل های سه‌بعدی گوداب و خیزاب، غیریکنواخت بودن ذرات بستر (ضریب یکنواختی بزرگ‌تر از ۴ در اطراف توده های گیاهی) و پراکندگی توده های گیاهی در بستر باشد. در واقع حضور شکل‌های سه‌بعدی بستر گوداب و خیزاب و پراکندگی توده های گیاهی به‌طور خاص در بازهٔ چهارم و دوم همانند مانعی دربرابر جریان عمل کرده و باعث افزایش نیروی مالشی وارد بر جریان، کاهش سرعت جریان، افزایش سرعت برشی و به‌دنبال آن افزایش مقاومت جریان شده‌است.

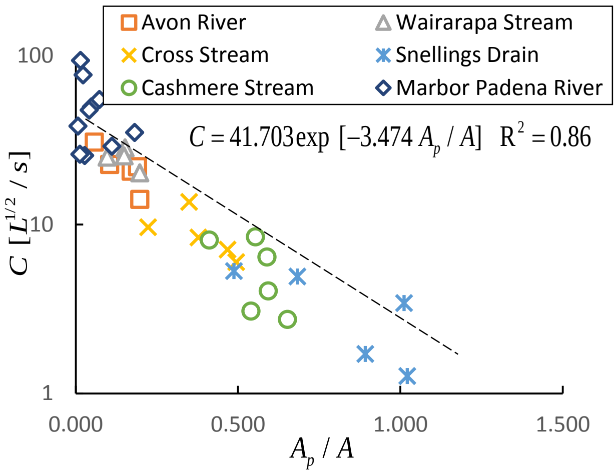
همان‌گونه که در شکل های (۹)، (۱۰) و (۱۲) مشاهده می شود، افزایش نسبت انسداد (حضور مانع دربرابر جریان) باعث افزایش ضریب دراگ، ضریب مانینگ و افزایش سرعت برشی جریان گردیده‌است. افزایش سرعت برشی به‌معنای افزایش ضریب دارسی ویسباخ و به‌دنبال آن، افزایش مقاومت جریان است.



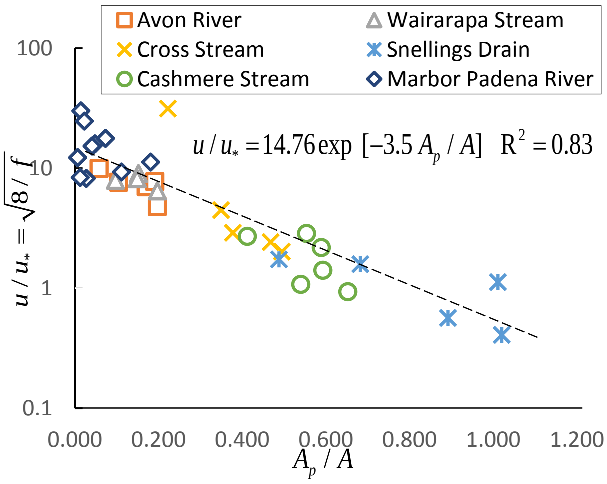
شکل ۹ ارتباط بین ضریب مانینگ و نسبت انسداد



شکل ۱۰ ارتباط بین ضریب دراگ و نسبت انسداد



شکل ۱۱ ارتباط بین ضریب شزی و نسبت انسداد



شکل ۱۲ ارتباط بین ضریب دارسی ویسباخ و نسبت انسداد

نیروی مالشی نیرویی مساوی و مختلف الجهت نیروی دراگ (نیروی وارد از سمت آب به بستر) است که از طرف بستر به جریان وارد می‌شود. مقایسهٔ مقدار متوسط ضریب دراگ در بازهٔ اول نسبت‌به بازهٔ دوم و سوم نشان می‌دهد که اضافه شدن توده‌های گیاهی مستغرق در حضور شکل‌های بزرگ مقیاس گوداب و خیزاب می‌تواند تقریبا تا ۴۰ درصد مقاومت جریان را افزایش دهد.

در شکل (۱۱) بر خلاف ضریب دراگ و ضریب مانینگ، افزایش نسبت انسداد باعث کاهش ضریب شزی شده‌است. حضور هر نوع مانعی در مسیر جریان باعث کاهش انتقال جریان و به‌دنبال آن کاهش ضریب شزی می‌شود. بنابراین از دیدگاه انتقال جریان حضور توده‌های گیاهی پراکنده در مسیر جریان باعث کاهش ضریب شزی می‌شود. مقایسهٔ مقدار متوسط ضریب شزی در بازهٔ اول نسبت‌به بازهٔ دوم و سوم نشان می‌دهد که حضور توده‌های مستغرق گیاهی در بستر می‌تواند انتقال جریان را به‌طور متوسط تا ۱۸ درصد کاهش دهد. به‌نظر می‌رسد که در حضور شکل‌های سه‌بعدی بستر در رودخانه‌های شنی که توده‌های گیاهی به‌صورت پراکنده در بستر رودخانه قرار گرفته‌اند، ضریب شزی با ضریب هم‌بستگی نسبتا بالا در مقایسه با سایر ضرایب مقاومت می‌تواند نمایندهٔ مناسبی برای مقاومت جریان در رودخانهٔ مورد مطالعه باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش نیم‌رخ سرعت در بازه‌های مختلف یک رودخانهٔ درشت‌دانهٔ شنی قلوه‌سنگی در حضور شکل‌بسترهای سه‌بعدی گوداب و خیزاب و توده‌های گیاهی پراکندهٔ مستغرق طبیعی مورد بررسی و آنالیز قرار گرفت. هم‌چنین روابطی نمایی به‌صورت تابعی از نسبت انسداد برای برآورد مقاومت جریان پیشنهاد شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که حضور توده‌های گیاهی مستغرق روی شکل‌های بستر گوداب و خیزاب می‌تواند جملات توزیع جهانی سرعت شامل سرعت جریان، سرعت برشی، مقدار ثابت ون کارمن و مقدار ثابت B_r را به‌طور قابل توجهی تغییر دهد که پی‌آمد آن برآورد متفاوت مقاومت جریان است.

مقدار ثابت فون کارمن κ تو سط پو شش گیاهی و شکل‌های بستر تغییر کردها ست و نمی‌تواند معادل ۰/٤ در نظر گرفته شود. مقدار κ در این پژوهش بین ۰/۱۸ تا ۰/۳۹ نوسان داشته‌است. بر این اساس حضور شکل‌های بستر گوداب و خیزاب و توده های گیاهی پراکندهٔ انعطاف‌پذیر در بستر رودخانه مقدار κ را کاهش می دهد.

مقدار پارامتر فرورفتگی به‌طور متوسط در قسمت‌های مختلف بازهٔ دوم $0.8h_w$ اندازه‌گیری شده که نسبت‌به بازهٔ اول حدود ۱۱ درصد افزایش و نسبت‌به بازه چهارم حدود ۱۲ درصد کاهش داشته‌است. دلیل این نوسانات پارامتر فرورفتگی را می‌توان به ناپایداری‌های ناشی از حضور شکل‌های بستر گوداب و خیزاب، غیریکنواخت بودن ذرات بستر و حضور توده‌های گیاهی پراکنده در بستر رودخانه ارتباط داد.

ارتباط بین ضریب مقاومت جریان با نسبت انسداد به‌صورت نمایی با ضریب هم‌بستگی معادل ۰/۸ محاسبه شد. این ارتباط غیرخطی می‌تواند نشئت گرفته از حضور شکل‌های سه‌بعدی گوداب و خیزاب، غیریکنواخت بودن ذارت بستر (ضریب یکنواختی بزرگ‌تر از ٤ در اطراف توده‌های گیاهی) و پراکندگی توده‌های گیاهی در بستر باشد. ضریب شزی با ضریب هم‌بستگی نسبتا بالا در مقایسه با سایر ضرایب مقاومت می‌تواند نمایندهٔ مناسبی برای مقاومت جریان در رودخانهٔ شنی قلوه‌سنگی مورد مطالعه باشد.

مراجع

1. Yen, B.C., "Open Channel Flow Resistance", *Journal of hydraulic engineering*, Vol. 128(1), pp. 20-39, (2002).
2. Afzalimehr, H., Riazi, P., Jahadi, M., Singh, V.P., "Effect of Vegetation Patches on Flow Structures and the Estimation of Friction Factor", *ISH Journal of Hydraulic Engineering*:019, Vol. 27, pp. 1-11, (2019).
3. Nikora, V., Larned, S., Nikora, N., Debnath, K., Cooper, G., Reid, M., "Hydraulic Resistance due to Aquatic Vegetation in Small Streams: Field Study", *Journal of hydraulic engineering*, Vol. 134(9), pp. 1326-1332, (2008).
4. Afzalimehr, H., Moghbel, R., Gallichand, J., Jueyi, S.U., "Investigation of Turbulence Characteristics in Channel with Dense Vegetation", *International Journal of Sediment Research*, Vol. 26(3), pp. 269-282, (2011).
5. Nikora, V., Larned, S., Debnath, K., Cooper, G., Reid, M., Nikora, N., "Effects of Aquatic and Bank-side Vegetation on Hydraulic Performance of Small Streams", in River Flow: *Proceedings of the*

International Conference on Fluvial Hydraulics, Lisbon, Portugal, 6-8 September 2006. 2006. Taylor & Francis, Vol. 1, pp. 639-646,(2006).

6. Kouwen, N., Unny, T. and Hill, H.M., "Flow Retardance in Vegetated Channels", *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, Vol. 95(2), pp. 329-342, (1969).
7. Wang, P. f., Wang, C. and Zhu, D.Z., "Hydraulic Resistance of Submerged Vegetation Related to Effective Height", *Journal of Hydrodynamics,* Vol. 22(2), pp. 265-273, (2010).
8. Li, S., Shi, H., Xiong, Z., Huai, W., Cheng, N., "New Formulation for the Effective Relative Roughness Height of Open Channel Flows with Submerged Vegetation, Advances in Water Resources", Vol. 86, pp. 46-57, (2015).
9. Fazlollahi, A., Afzalimehr, H. and Sui, J., "Effect of Slope Angle of an Artificial Pool on Distributions of Turbulence", *International Journal of Sediment Research,* Vol. 3(2) ,pp. 93-99, (2015).
10. Afzalimehr, H., Maddahi, M.R., Sui, J., Rahimpour, M., "Impacts of Vegetation over Bedforms on Flow Characteristics in Gravel-bed Rivers", *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 31(5), pp. 986-998, (2019).
11. Jahadi, M., Afzalimehr, H. and Rowinski, P.M., "Flow Structure within a Vegetation Patch in a Gravel-Bed River", *Journal of Hydrology and Hydromechanics,* Vol. 67(2), pp. 154-162, (2019).
12. Wolman, M.G., A Method of Sampling Coarse River- bed Material, EOS, "Transactions American Geophysical Union", Vol. 35(6), pp. 951-956, (1954).
13. Maddahi, M.R., Afzalimehr, H. and Rowinski, P.M., "Flow Characteristics over a Gravel Bedform: Kaj River case study, Acta Geophysica", Vol. 64(5), pp. 1779-1796, (2016).
14. Afzalimehr, H., Barahimi, M. and Sui, J., "Non-uniform Flow over Ccobble Bed with Submerged Vegetation Strip", in Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management. Thomas Telford Ltd.(2019)
15. Afzalimehr, H., Anctil, F., "Velocity Distribution and Shear Velocity Behaviour of Decelerating Flows over a Gravel Bed", *Canadian Journal of Civil Engineering,* Vol. 26(4), pp. 468-475, (1999).
16. Afzalimehr, H. and Anctil, F., "Accelerating Shear Velocity in Gravel-bed Channels", *Hydrological sciences journal*, Vol. 45(1), pp. 113-124, (2000).
17. Hinze, J.O., Turbulence (McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering), Mcgraw-Hill College, (1975).
18. Kironoto, B., Graf, W. H., and Rreynolds, "Turbulence Characteristics in Rough Uniform Open-channel Flow", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy,* Vol. 106(4), pp. 333-344, (1994).
19. Afzalimehr, H. and Rennie, C.D., "Determination of Bed Shear Stress in Gravel-bed Rivers Using Boundary-layer Parameters", *Hydrological sciences journal*, Vol. 54(1), pp. 147-159, (2009).

20. Hinze, J., Turbulence 2’nd edition, MacGraw Hill, New-York, (1975)
21. Coleman, H. W., Moffat, R. J., and Kays, W.M., "The Accelerated Fully Rough Turbulent Boundary Layer", *Journal of Fluid Mechanics,* Vol. 82(3), pp. 507-528, (1977).
22. Bassey, O. B., and Agunwamba, J., "Derived Models for the Prediction of Cole’s and Dip Parameters for Velocity Gradients Determination in Open Natural Channels", (1998).
23. Afzalimehr, H., Mohammadzade, N., and Singh, V. P., "Experimental Investigation of Influence of Vegetation on Flow Turbulence", (2015).
24. Afzalimehr, H., Heidarpour, M., and Farshi, S., "Resistance to Flow in Gravel-bed Rivers", *Isfahan University of Technology-Journal of Crop Production and Processing,* Vol. 7(1), pp. 19-31, (2003).
25. Green, J. C., "Comparison of Blockage Factors in Modelling the Resistance of Channels Containing Submerged Macrophytes", *River research and applications,* Vol. (6)21, pp. 671-686, (2005).